

УДК 621.314

Дизель-генераторная электростанция с переменной частотой вращения вала

Хватов О.С., д-р техн. наук, Дарьенков А.Б., канд. техн. наук, Тарасов И.М., асп.

Приведено описание структурных схем дизельной электростанции с переменной частотой вращения вала на базе синхронного генератора. Показано, что экономичная работа дизельной электростанции возможна только при переменной частоте вращения вала.

Ключевые слова: электростанция, дизель-генератор, синхронный генератор, преобразователь частоты.

Diesel-generator Power Plant with Shaft Frequency Rotation

O.S. Khvatov, Doctor of Engineering, A.B. Daryenkov, Candidate of Engineering, I.M. Tarasov, Post Graduate Student

The article proves that efficient performance of diesel engine power plant is possible only at variable shaft frequency rotation. The authors describe a structure chart of diesel engine power plant at variable shaft frequency rotation based on synchronous generator.

Key words: power plant, diesel-generator, synchronous generator, frequency converter.

Значительная часть территории России, имеющая малую плотность населения, не присоединена к централизованным электроэнергетическим системам. К таким территориям относятся Дальний Восток, северные территории и некоторые другие регионы. Численность населения, проживающего на этих территориях, составляет около 10 млн человек. Оно получает электроэнергию от автономных дизель-генераторных установок (Д-Г) небольшой мощности, ветроэнергетических установок, малых ГЭС и некоторых других возобновляемых источников энергии [1].

Из приведенных систем наибольшее распространение в изолированных электроэнергетических системах получили Д-Г. Они, обладая высокой надежностью, достаточно большим моторесурсом и долговечностью, не заменимы в качестве автономных источников основного и резервного электроснабжения. Однако топливо, необходимое для работы Д-Г, завозится из удаленных центров водным, автомобильным транспортом, а иногда даже вертолетами, что делает его доставку очень дорогой. Кроме этого, доставка топлива в удаленные районы зачастую зависит от погодных условий, от времени года, поэтому не всегда возможна.

Для обеспечения вышеназванных районов электроэнергией используется около 50 тыс. Д-Г суммарной мощностью 17 млн кВт с выработкой электроэнергии около 50 млрд кВтч в год. Расход топлива этими электростанциями составляет около 6 млн т у.т. [2]. Необходимо отметить, что системы Д-Г также широко применяются для построения основных и аварийных электростанций судов. Системы Д-Г строятся, как правило, на базе генераторов переменного тока. В качестве преобразователя механической энергии в электрическую в них обычно применяется синхронный генератор (СГ). Подавляющее большинство суще-

ствующих Д-Г работают с постоянной (номинальной) частотой вращения вала во всем диапазоне изменения нагрузки. В таких Д-Г стабилизация частоты переменного напряжения статора СГ обеспечивается стабилизацией частоты вращения вала дизеля, а стабилизация амплитуды напряжения статора СГ – изменением тока в обмотке возбуждения [3].

При постоянной частоте вращения основные показатели дизеля (расход топлива, эффективный и механический КПД и др.) можно оценивать в зависимости от одного из показателей, отражающих нагрузку на его валу. Таким показателем может быть эффективная мощность N_e (рис. 1) [4,5].

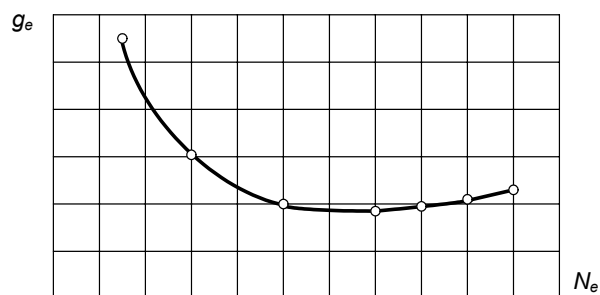


Рис. 1. Нагрузочная характеристика дизеля ($n = \text{const}$)

Анализ нагрузочной характеристики дизеля (рис. 1) показывает, что кривая расхода топлива g_e имеет выраженный минимум при частичной нагрузке двигателя. Следовательно, дизель, работая при постоянной частоте вращения, но при переменной нагрузке, как это обычно бывает, в основном работает с неоптимальным расходом топлива (с неоптимальным КПД).

Для выбора экономичного режима работы дизеля, работающего при изменяющейся нагрузке, удобно использовать его многопараметровую характеристику. Многопараметровая ха-

рактика дизеля строится в системе, в которой координатами служат два основных показателя его работы при различных значениях третьего, используемого в качестве параметра и остающегося постоянным для каждой из нанесенных кривых [4]. На многопараметровой характеристике, представленной на рис. 2, штрихпунктирной линией показана зависимость эффективного давления p_e и эффективной мощности N_e от частоты вращения вала дизеля при наименьшем удельном расходе топлива g_e .

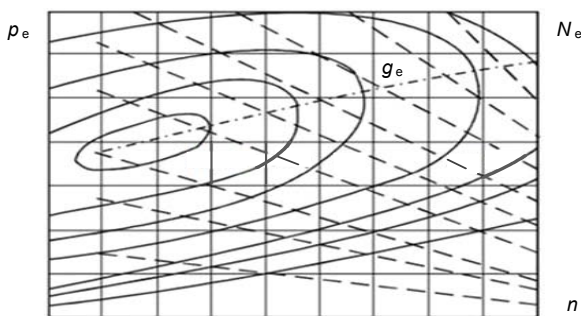


Рис. 2. Многопараметровая характеристика дизеля

Анализ полученных зависимостей (рис. 2) показывает, что при изменяющейся нагрузке для обеспечения экономичного режима работы дизеля необходима его работа при переменной частоте вращения. При этом приводимый во вращение дизелем СГ будет вырабатывать напряжение, частота которого будет меняться и, как правило, будет ниже номинального значения. Это требует совершенно нового подхода к построению системы Д-Г, который должен обеспечивать стабилизацию выходных напряжения и частоты СГ с помощью преобразователя частоты (ПЧ). Разработки систем Д-Г переменной частоты вращения являются весьма перспективными. Работы в этом направлении лежат в рамках программ энергосбережения, особо актуальных в настоящее время. В России данной проблематикой занимаются ОАО «Звезда» (г. Санкт-Петербург), ЗАО «НПЦ малой энергетики» (г. Москва), ЗАО «Сигна» (г. Ковров, Владимирская область), Волжская государственная академия инженеров водного транспорта и Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева (г. Н. Новгород), за рубежом – фирма «Сименс» и др.

Существующие системы Д-Г переменной частоты вращения строятся по схеме, представленной на рис. 3 [2, 6, 7]. В таких системах (рис. 3)

экономия топлива может достигать 20 % [2]. Частота напряжения на выходных выводах 6 установки стабилизируется на заданном уровне посредством ПЧ 5, состоящего из выпрямителя 3 и автономного инвертора напряжения 4. Стабилизация амплитуды напряжения статора СГ 2, соединенного с валом дизеля 1, выполняется путем воздействия системы управления 7 на величину тока обмотки возбуждения СГ 2, что, на наш взгляд, является недостатком таких систем (рис. 3). Известно, что напряжение статора генератора переменного тока пропорционально частоте вращения его вала. С точки зрения топливной экономичности при изменении мощности нагрузки частоту вращения вала дизеля следует менять в широких пределах, при этом минимальная частота вращения вала может в несколько раз отличаться от номинальной частоты [2]. Следовательно, и амплитуда напряжения СГ будет меняться в широком диапазоне, и ее минимальное значение будет в несколько раз меньше номинального значения. При этом способ стабилизации амплитуды напряжения статора СГ, основанный на воздействии на ток обмотки возбуждения, не обеспечит поддержания его на уровне номинального значения.

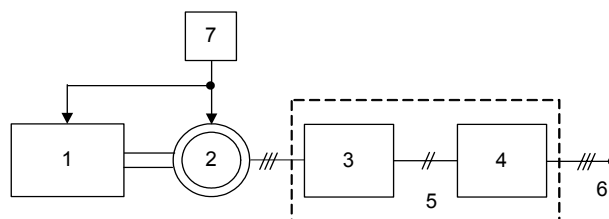


Рис. 3. Функциональная схема Д-Г переменной частоты вращения: 1 – дизель; 2 – СГ; 3 – выпрямитель; 4 – инвертор напряжения; 5 – ПЧ; 6 – выходные выводы; 7 – система управления

Нами предлагается вариант построения системы Д-Г переменной частоты вращения на базе ПЧ со звеном постоянного напряжения с выходным повышающим трансформатором (рис. 4) [10].

Устройство работает следующим образом. Блок формирования оптимальной частоты вращения вала дизеля 1 получает сигнал с блока вычисления мощности нагрузки 22, который соединен с выходами датчика напряжения 21 и датчика тока 7, измеряющими соответственно напряжение и ток на выходе инвертора 5.

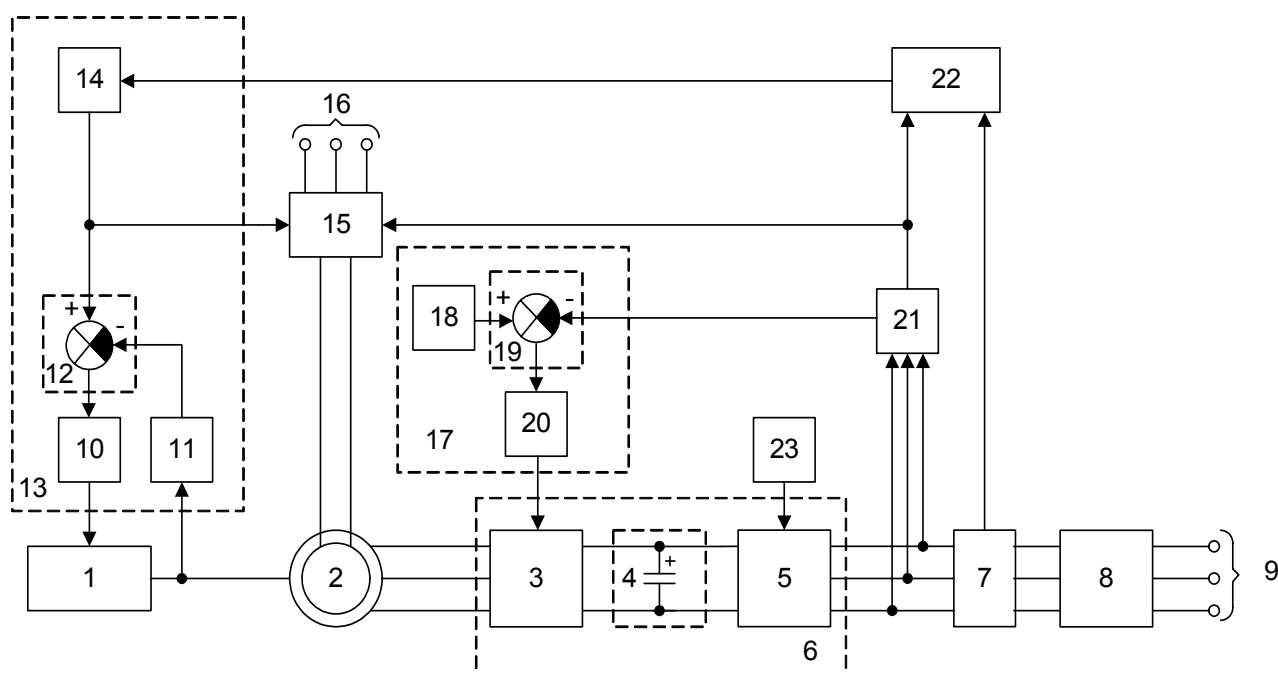


Рис. 4. Функциональная схема системы Д-Г переменной частоты вращения с выходным повышающим трансформатором: 1 – дизель; 2 – СГ; 3 – управляемый выпрямитель; 4 – конденсаторная батарея; 5 – инвертор напряжения; 6 – ПЧ; 7 – датчик тока; 8 – повышающий трансформатор; 9 – выходные выводы; 10 – регулятор частоты вращения вала дизеля; 11 – датчик частоты вращения вала дизеля; 12, 19 – сумматоры; 13 – блок формирования оптимальной частоты вращения вала дизеля; 14 – блок задания экономичной частоты вращения вала дизеля; 15 – блок возбуждения СГ; 16 – выводы подключения питания блока возбуждения СГ; 17 – блок стабилизации напряжения; 18 – задатчик напряжения; 20 – регулятор напряжения; 21 – датчик напряжения; 22 – блок вычисления мощности нагрузки; 23 – задатчик частоты выходного напряжения

В зависимости от значения мощности нагрузки, блок 14 задания экономичной частоты вращения вала дизеля 1, в программу работы которого заложены оптимальные зависимости частоты вращения дизеля 1 от мощности нагрузки, соответствующие минимальному расходу топлива, задает оптимальную частоту вращения вала дизеля 1. С помощью сумматора сигналов 12 вычисляется разность сигнала задания оптимальной частоты вращения вала дизеля 1 от блока 14 и сигнала датчика 11 частоты вращения вала дизеля 1. Сигнал от сумматора 12 поступает на вход регулятора 10 частоты вращения вала дизеля 1, который поддерживает частоту вращения вала дизеля 1 на уровне, заданном блоком 14. Таким образом, при изменении мощности нагрузки на выходных выводах 9, а значит, и на валу дизеля 1, частота вращения вала дизеля 1 будет поддерживаться оптимальной с точки зрения минимального потребления топлива.

Поскольку частота вращения вала дизеля 1 будет изменяться в зависимости от мощности нагрузки, то амплитуда и частота переменного напряжения СГ 2 будут также изменяться в зависимости от мощности нагрузки.

Стабилизация амплитуды переменного напряжения на выходных выводах 9 на уровне номинального значения для СГ 2 осуществляется следующим образом. Управляемый выпрямитель 3 преобразует переменное напря-

жение статора СГ 2 в постоянное напряжение заданной величины. Стабилизация выходного напряжения управляемого выпрямителя 3 на заданном уровне осуществляется с помощью блока 17 стабилизации напряжения, в состав которого входит блок регулятора напряжения 20, вход которого подключен к сумматору сигналов 19, на входы которого поступают сигналы с задатчика напряжения 18 и с датчика напряжения 21. Для сглаживания выходного напряжения управляемого выпрямителя 3 на его выходе включена конденсаторная батарея 4, которая необходима также для работы инвертора напряжения 5. Выходное напряжение управляемого выпрямителя 3 преобразуется с помощью инвертора 5 в переменное напряжение синусоидальной формы, амплитуда которого равна постоянному напряжению на выходе управляемого выпрямителя 3.

При изменении мощности нагрузки от нуля до номинального значения частота вращения вала дизеля 1, а следовательно, и амплитуда напряжения СГ 2 будут меняться в широком диапазоне. При этом выходное напряжение управляемого выпрямителя 3, а значит, и амплитуда переменного напряжения на выходных выводах 9 будут меняться в широком диапазоне и будут меньше номинального значения напряжения статора СГ 2. Для повышения выходного напряжения на выходных выводах 9 до уровня номинального напряжения СГ 2 на вы-

ходе ПЧ 6 включен повышающий трансформатор 8. Задавая с помощью блока задатчика напряжения 18 величину выходного напряжения управляемого выпрямителя 3 равной отношению амплитуды номинального напряжения статора СГ 2 к коэффициенту трансформации повышающего трансформатора 8, на выходных выводах 9 получим переменное трехфазное напряжение, амплитуда которого равна номинальному значению для СГ 2.

Блок 15 возбуждения СГ 2, получающий питание через выводы 16 подключения питания, формирует ток в обмотке возбуждения СГ 2 с учетом сигнала от блока 14 задания экономичной частоты вращения вала дизеля 1 и от датчика напряжения 21. Таким образом, при изменении частоты вращения вала дизеля 1 на выходных выводах 9 поддерживается амплитуда переменного трехфазного напряжения на уровне номинального значения для статора СГ 2.

Частота выходного трехфазного напряжения на выходных выводах 9 при изменении частоты вращения вала дизеля 1 поддерживается неизменной с помощью инвертора 5 на уровне, задаваемом блоком задатчика частоты 23 выходного напряжения. Построение Д-Г электростанции по схеме, представленной на рис. 4, позволит повысить экономию топлива, по сравнению с реализацией Д-Г электростанции по схеме рис. 3.

Конденсаторная батарея 4, входящая в состав ПЧ 6, является накопителем энергии и компенсирует пики и провалы энергии в динамических режимах. С другой стороны, наличие в схеме конденсаторной батареи 4 является существенным недостатком. Батарея конденсаторов является довольно дорогостоящим и одним из самых ненадежных элементов двухзвенных ПЧ. Конденсаторы занимают от 30 до 50 % общего объема инвертора, более того, наличие конденсаторов сужает диапазон рабочих температур. Электролитические конденсаторы имеют более ограниченный срок службы, чем остальные элементы двухзвенного ПЧ. Кроме того, в ПЧ со звеном постоянного напряжения происходит двукратное преобразование энергии, которое не только увеличивает потери энергии, но и ухудшает массогабаритные показатели преобразователя.

В последние годы наметилась тенденция к созданию более совершенных топологий ПЧ переменного тока. К таким топологиям, в первую очередь, относятся матричные структуры [8]. Матричный непосредственный ПЧ (МПЧ) по схеме, представленной на рис.5, впервые был предложен в 1980 г. [9]. Преобразователь данного типа представляет собой матрицу из девяти ключей переменного тока 1–9 (рис. 5), которые могут коммутировать любую фазу питающей сети 10 к любой фазе нагрузки 11.

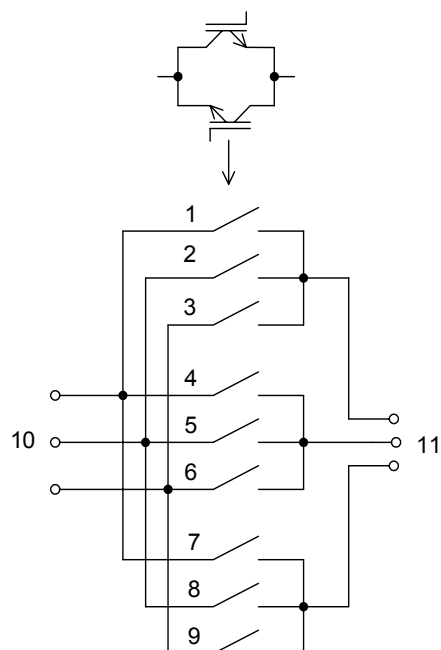


Рис. 5. МПЧ трехфазного напряжения в трехфазное: 1–9 – ключи переменного тока; 10 – входные выводы питающей сети; 11 – выходные выводы для подключения нагрузки

Каждый ключ 1–9 состоит из двух встречно-параллельно включенных IGBT-транзисторов. Ключи МПЧ управляются по принципу ШИМ и позволяют обеспечить возможность получения на выходе преобразователя частот теоретически неограниченного диапазона, как и у двухзвенного ПЧ.

МПЧ, по сравнению с двухзвенными ПЧ, обладают рядом преимуществ, такими как более высокий КПД, благодаря однократному преобразованию электрической энергии; возможность формирования входного тока, близкого к синусоидальному с коэффициентом сдвига, равным единице; отсутствие в силовой схеме конденсаторов большой емкости, благодаря чему расширяется рабочий диапазон температур и увеличивается срок службы.

К недостаткам МПЧ можно отнести существенно более сложные, по сравнению с двухзвенными ПЧ, алгоритмы управления, что препятствует широкому производству и применению преобразователей данного типа [8]. Один из немногих производителей МПЧ – компания FUJI Electric, которая в 2006 г. одной из первых в мире выпустила в серийное производство МПЧ серии FRENIC-MX [10].

Замена ПЧ 6 в Д-Г переменной частоты вращения вала (рис. 4) на МПЧ позволит повысить КПД всей установки в целом, ее надежность, а также снизить массогабаритные показатели установки [10].

Заключение

Работа системы Д-Г с переменной частотой вращения вала обеспечит существенную экономию дорогостоящих топливных ресурсов. ПЧ в таких системах могут строиться как по схеме двухзвенного ПЧ, так и по схеме МПЧ. Двухзвенный ПЧ содержит конденсаторную батарею, которая компенсирует пики и провалы напряжения в динамических режимах, но снижает надежность работы установки. МПЧ, по сравнению с двухзвенным ПЧ, характеризуется отсутствием конденсаторной батареи, более высоким КПД, но и более сложными алгоритмами управления.

Список литературы

1. **Хватов О.С.** Управляемые генераторные комплексы на основе машины двойного питания / НГТУ. – Н.Новгород, 2000.

2. **Алешков О.А.** Повышение топливной экономичности первичного дизеля в составе многофункционального энерготехнологического комплекса оптимизацией скоростного режима: Автореф. дис... канд. техн. наук. – Барнаул, 2009.

3. **Мещанинов П.А.** Автоматизация судовых электроэнергетических систем. – Л.: Судостроение, 1970.

4. **Двигатели** внутреннего сгорания: Теория поршневых и комбинированных двигателей / Под ред. А.С. Орлина, М.Г. Круглова. 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1983.

5. **Михайлов В.А.** Автоматизированные электроэнергетические системы судов. – Л.: Судостроение, 1977.

6. **Парников Н.М.** Повышение энергетической эффективности комплексов децентрализованного электропитания на примере Республики Саха (Якутия): Автореф. дис... канд. техн. наук. – Томск, 2009.

7. **Патент** РФ № 34817 на полезную модель. МПК H02J 3/46. Автономный источник электропитания стабильной частоты (варианты), 2003.

8. **Дарьенков А.Б., Хватов О.С., Мирясов Г.М.** Современные тенденции в построении силовых преобразователей переменного напряжения / Тр. Нижегородского государственного технического университета. Т. 77. – Н. Новгород, 2009. – С. 21–25.

9. **Vose В.К.** odern Power Electronics and AC Drives. – Prentice Hall Ptr, 2002.

10. **Преобразователи** частоты FUJI Electric: опыт лидера. <http://www.Bitek-e.ru/ProgressFuji.htm>.

11. **Дарьенков А.Б., Хватов О.С.** Автономная высокоэффективная электрогенерирующая станция / Тр. Нижегородского государственного технического университета. Т. 77. – Н. Новгород, 2009. – С. 68–72.

Хватов Олег Станиславович,

Волжская государственная академия инженеров водного транспорта,

доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой электротехники и электрооборудования объектов водного транспорта,

телефон (831) 4-193-439,

e-mail: khvatov@aqu.sci-nnov.ru

Дарьенков Андрей Борисович,

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева,

кандидат технических наук, доцент кафедры электрооборудования судов,

телефон (831) 4-369-379,

адрес: г. Нижний Новгород, ул. Минина, д.24, ауд. 1114, деканат ФАЭ,

e-mail: fae@nntu.nnov.ru

Тарасов Иван Михайлович,

Волжская государственная академия инженеров водного транспорта,

аспирант,

e-mail: khvatov@aqu.sci-nnov.ru